doi:10.13866/j.azr.2019.01.29

不同生境白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛沙堆形态特征①

魏亚娟[1], 汪 季[1,2], 党晓宏[1,2], 张 勇[3], 解云虎[1], 沈桂露[4], 丁延龙[1], 万 芳[1]

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院,内蒙古,呼和浩特 010018;
2. 内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站,内蒙古 鄂尔多斯 017400;
3. 锡林郭勒盟林业监测规划院,内蒙古 锡林浩特 026000; 4. 内蒙古兰太实业股份有限公司,内蒙古 阿拉善 750336)

摘 要: 以吉兰泰荒漠绿洲过渡带为研究区,通过对不同生境条件下的白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛沙堆形态特征、各形态参数间关系及白刺灌丛生长特征进行定量分析。结果表明:① 随着梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林龄的增加(白刺纯林除外),白刺灌丛沙堆各形态参数变化范围较大,并向长椭球形方向发展,部分向不对称"蝌蚪状"方向演化。② 4 种不同生境条件下,白刺灌丛沙堆各形态参数相关系数均在 0.782 以上($P<0.01$),表现为显著性相关,这是各生境白刺灌丛沙堆协同发展的结果。③ 对各生境白刺灌丛沙堆长轴与短轴、水平尺度与沙堆高度之间进行回归方程分析,分别呈显著性线性关系($R^2>0.7217$)和幂函数、二次函数关系($R^2>0.8351$)且斜率均为正,表明 4 种生境灌丛沙堆均处于发育阶段。④ 白刺灌丛株高和盖度对灌丛沙堆形态特征有明显影响,即白刺灌丛株高越高、盖度越大,白刺灌丛沙堆高度、底面积和体积也逐渐增大。

关键词: 白刺灌丛; 沙堆; 梭梭; 形态特征; 荒漠-绿洲过渡带; 吉兰泰; 乌兰布和沙漠

灌丛沙堆是一种常见的风蚀地貌景观,是指在地表风沙流作用下,沙粒被灌丛植被阻拦,沙物质逐渐在其周围堆积,从而形成的一种常见风积地貌[1]。其发育主要分为 4 个阶段:雏形阶段、发育阶段、稳定阶段和活化阶段[2]。灌丛沙堆形成的基础条件是灌丛,特别是植被盖度和其周围环境是影响灌丛沙堆发育的重要因素[3]。灌丛沙堆发育受区域环境影响较大,形成灌丛沙堆的植被类型具有多样性,在我国灌丛沙堆类型主要包括柽柳(*Tamarix chinensis*)、胡杨(*Populus euphratica*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和蒿类(*Artemisia* spp.)。灌丛沙堆一般发生在干旱、半干旱及干燥的亚湿润地区,是土地退化的重要标志[4]。因此,自 20 世纪 80 年代以来,国内外学者对灌丛沙堆进行了大量的研究。但主要集中在灌丛沙堆形态演变[5]、空间分布格局[6]、土壤理化性质和土壤水分[7]等方面。且其研究均针对纯林灌丛沙堆,而对不同植被与白刺灌丛沙堆混合区形态参数的相关性和灌丛生长发育特征研究较少。本研究从维持天然白刺灌丛沙堆的稳定性和持久性生态效益角度出发,运用统计学和生态学原理和方法,对样区内白刺灌丛沙堆实测形态参数进行统计学分析,并对其形态特征、白刺灌丛沙堆的发育状况及灌丛生长状况进行比较分析。以期为吉兰泰荒漠-绿洲过渡带白刺灌丛沙堆保育提供科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠西南缘吉兰泰荒漠绿洲地区 3 号井附近(图 1),地理位置 105°39′40″~105°44′56″E;39°45′26″~39°46′38″N。海拔 970 m 左右,地势西北高,东南低。研究区属于大陆性季风气候,干旱少雨,蒸发量大,夏季炎热,冬季寒冷,年

① **收稿日期:** 2018-03-24; **修订日期:** 2018-07-06
基金项目: 国家重点研发计划专项"内蒙古干旱荒漠区沙化土地治理与沙产业技术研发与示范"和"绿洲盐碱湖区沙害防治关键技术研究与示范"项目(2016YFC0501003)资助
作者简介: 魏亚娟(1994-),女,博士研究生,研究方向为荒漠化防治
通讯作者: 党晓宏. E-mail:dangxiaohong1986@126.com

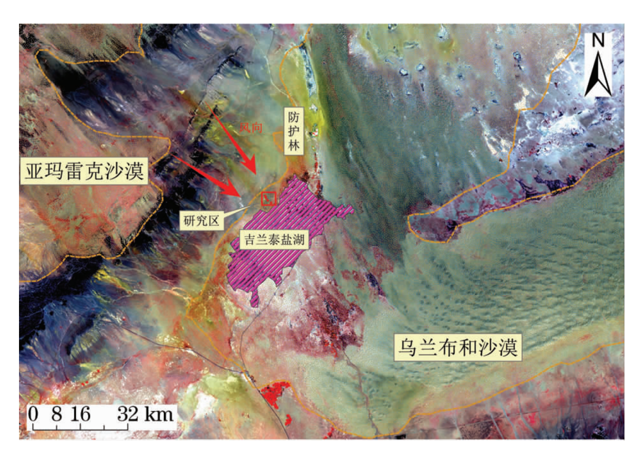


图 1　研究区位置示意图

Fig. 1　Geographical location of the study area

平均气温为 8.6 ℃,绝对最高气温为 40.9 ℃,绝对最低气温为 -31.2 ℃,年平均降水量为 121.1 mm (1980—2016 年),降水多集中在 7、8、9 月,年降水变率达 135.9 mm。年平均风速 3.5 m · s^{-1},平均最大风速 15 m · s^{-1},全年大风天数平均在 34 d 左右。主风向为 NNW 和 NWW[8]。土壤类型以风沙土和灰棕漠土为主。常见植物以灌木为主,主要分布着超旱生和旱生植被类型,建群种为人工梭梭和白刺、还分布着少量的沙蒿(*Artemisa arenaria*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)和沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等。

1.2　研究方法

研究区 4 种生境均位于乌兰布和沙漠西南缘,其距离亚玛雷克沙源区距离:白刺纯林 > 白刺 + 15 a人工梭梭林 > 白刺 + 5 a 人工梭梭林 > 白刺 + 10 a 人工梭梭林。2017 年 4 月对研究区白刺灌丛沙堆分布情况进行了野外调查。在此基础上,以研究区 3 种林龄(5 a、10 a 和 15 a)人工梭梭林下的白刺灌丛沙堆为研究对象,以没有梭梭林的白刺灌丛沙堆为空白对照(表 1)。每一种林龄设置的样地规格为 50 m × 50 m ,沿着主风向,每种生境筛选出不同大小具有代表性的 20 个白刺灌丛沙堆,总计 80 个白刺灌丛沙堆,利用 GPS 定位,用皮尺对白刺灌丛沙堆的长轴长(L)、短轴长(W)、沙堆高(H)等形态特征进行实地测定。由于样地内白刺灌丛沙堆呈长椭球体,故水平尺度(D)、底面积(A)和沙堆体积(V)用公式表示如下[9-10]:

$$D = (L + W)/2$$

$$A = \pi(L + W)/4$$

$$V = \pi(L \times W \times H)/6$$

在测定白刺灌丛沙堆形态参数的同时,对每个白刺灌丛沙堆白刺株高进行测定,对其测定 5 次,然后取平均值。对每个样地的 20 个白刺灌丛沙堆,根据其沙堆大小分别采用 1 m × 1 m 或 0.5 m × 0.5 m 测定该白刺灌丛沙堆植被盖度。

利用 SPSS 20.0 软件 one-way ANOVA 法和 Microsoft Excel 2007 对白刺灌丛形态参数与白刺盖度进行数理统计分析和绘图。根据相关系数 $|r|$ 对各参数之间的关系进行分级,当 $|r| < 0.3$ 时,为微弱线性相关;当 $0.3 < |r| \leq 0.5$ 时,为低度线性相关;当 $0.5 < |r| \leq 0.8$ 时,为显著线性相关;当 $|r| > 0.8$ 时,为高度线性相关[2]。然后对数据进行相关性分析和回归分析。

2　结果与分析

2.1　不同生境白刺灌丛沙堆形态特征

对研究区 4 种生境 80 个白刺灌丛沙堆进行统计分析(表 2),结果表明:不同生境条件下,白刺灌丛沙堆形态参数变化范围较大。白刺灌丛沙堆各形态和规模(除长轴/短轴)及白刺株高均为:白刺纯林 > 白刺 + 15 a 人工梭梭林 > 白刺 + 10 a 人工梭梭林 > 白刺 + 5 a 人工梭梭林。说明随着人工梭梭林龄增大,白刺灌丛沙堆各形态和规模及白刺平均株

表 1　不同林龄人工梭梭林的群落特征(平均值 ± 标准误)

Tab. 1　Characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantation community with different stand ages

林龄	海拔 /m	株行距 /m	株高 /cm	冠幅/cm		梭梭保存率/%	物种分布
				长度	宽度		
白刺	968	-	-	-	-	-	建群种为白刺,伴有少量沙蒿、芨芨草(*Achnatherum splendens*)
白刺 + 15 a 人工梭梭	975	4 × 5	159 ± 13.23	135.67 ± 9.45	124 ± 1.73	90	建群种为梭梭和白刺,伴有少量的沙米、柽柳
白刺 + 10 a 人工梭梭	960	4 × 4	141 ± 5.57	117 ± 10.44	105.33 ± 6.03	90	建群种为梭梭和白刺,伴有少量的沙米
白刺 + 5 a 人工梭梭	972	4 × 4	95.33 ± 3.06	89.33 ± 5.13	88.67 ± 7.02	90	建群种为梭梭和白刺,伴有少量的沙米、沙蒿

表 2　不同样地白刺灌丛沙堆的形态特征

Tab. 2　Morphological features of *Nitraria tangutorum* nebkhas in different sample plots

样地		长轴/m	短轴/m	水平尺度/m	长轴/短轴	高度/m	底面积/m^2	体积/m^3	株高/m
白刺纯林	最大值	16.40	12.68	14.20	1.69	3.07	154.49	314.95	0.95
	最小值	7.40	5.60	6.50	1.03	0.30	32.53	6.51	0.41
	平均值±标准误	13.24±2.89a	9.33±2.01a	11.29±2.37a	1.29±0.17ab	1.72±0.78a	100.71±38.74a	132.9±93.08a	0.62±0.15a
	变异系数	0.22	0.22	0.21	0.12	0.45	0.38	0.70	0.25
	样本数	20	20	20	20	20	20	20	20
白刺+15 a 人工梭梭	最大值	13.65	11.16	12.40	1.45	1.60	119.56	127.65	0.61
	最小值	8.14	6.58	7.69	1.12	0.48	46.07	17.41	0.34
	平均值±标准误	10.62±1.41b	8.25±1.21b	9.44±1.27b	1.34±0.09b	0.8±0.26b	69.96±19.29b	39.86±25.97b	0.44±0.10b
	变异系数	0.13	0.15	0.13	0.07	0.33	0.28	0.65	0.23
	样本数	20	20	20	20	20	20	20	20
白刺+10 a 人工梭梭	最大值	7.80	7.34	7.23	2.02	0.98	41.02	24.03	0.57
	最小值	5.00	2.48	3.74	0.97	0.21	9.73	1.36	0.32
	平均值±标准误	6.63±0.82c	5.13±1.26c	5.88±1.00c	1.43±0.24b	0.6±0.20b	27.38±9.29c	12.03±7.09b	0.41±0.15b
	变异系数	0.12	0.25	0.17	0.18	0.33	0.34	0.59	0.28
	样本数	20	20	20	20	20	20	20	20
白刺+5 a 人工梭梭	最大值	4.68	3.10	3.66	2.05	0.95	10.03	5.88	0.47
	最小值	1.34	0.74	1.04	1.06	0.26	0.78	0.13	0.17
	平均值±标准误	3.31±1.06d	2.12±0.61d	2.71±0.80d	1.56±0.27a	0.58±0.21b	5.91±2.99d	2.63±1.91b	0.26±0.17c
	变异系数	0.32	0.29	0.30	0.17	0.36	0.51	0.72	0.65
	样本数	20	20	20	20	20	20	20	20

高逐渐增大(除白刺纯林外)。4 种生境白刺灌丛沙堆长轴、短轴、水平尺度和底面积呈显著差异($P<0.05$),而高度、体积差异不显著($P>0.05$),白刺+15 a 人工梭梭林与白刺+10 a 人工梭梭林生境之间白刺株高差异不显著($P>0.05$),与其他生境之间差异显著($P<0.05$)。白刺灌丛沙堆形态参数与白刺株高变异系数变化范围较小,说明白刺灌丛沙堆发育较为稳定。此外,长轴/短轴逐渐增大,说明随着梭梭林龄减小,梭梭对风的阻碍作用减小,风将白刺灌丛沙堆进行拉伸,限制了宽度发育,使白刺灌丛沙堆部分向不对称方向发展。

2.2　不同生境白刺灌丛沙堆形态参数关系

2.2.1　白刺灌丛沙堆形态参数相关性分析　从表 3 可以看出,白刺灌丛沙堆各形态参数呈现良好的相关性。4 种生境中,各形态参数之间相关系数 r 在 0.01 显著水平上均大于 0.782,表现为显著相关。尤其是 4 种生境的沙堆长轴与短轴、沙堆高与底面积和水平尺度的相关系数 r 均大于 0.822($P<0.01$),表现为高度线性相关。这是白刺灌丛沙堆各形态参数之间协同发展的表现。

2.2.2　白刺灌丛沙堆形态参数线性回归分析　为了进一步了解各生境白刺灌丛沙堆形态参数之间相关关系及发育状态,选择其中相关关系较好且具有一定物理意义的长轴与短轴、水平尺度与高度之间做回归分析。

就拟合关系而言,4 种不同生境条件下,白刺灌丛沙堆长轴与短轴最佳拟合模型为线性函数,其函数关系式及 R^2 分别为 $W=0.5969L+1.4258$,$R^2=0.7369$;$W=0.7556L+0.2256$,$R^2=0.7811$;$W=1.3192L-3.621$,$R^2=0.7318$;$W=0.4875L+0.5083$,$R^2=0.7217$,其 R^2 值均在 0.70 以上。说明 4 种生境条件下,短轴随长轴的增加而增加,即长轴与短轴协同发展。其保证了底面积始终保持椭圆形不变。另外,其变化速率为:白刺+10 a 人工梭梭林>白刺+15 a 人工梭梭林>白刺纯林>白刺+5 a人工梭梭林。说明流经白刺+10 a 人工梭梭林样地的沙源丰富,同时也说明该样地梭梭林对风沙具有较好的阻拦的效果(图 2)。

回归分析表明,4 种生境白刺灌丛沙堆水平尺度与沙堆高度最佳拟合模型分别为幂函数和二次多项式函数关系,其函数关系式及 R^2 分别为 $H=0.0051D^{2.3673}$,$R^2=0.8809$;$H=0.0601D^2-0.9966D+4.7578$,$R^2=0.8484$;$H=0.0015D^2+0.164D-0.4174$,$R^2=0.844$ 和 $H=0.0407D^2+0.033D+0.1699$,$R^2=0.8351$。其幂指数大于 1,二次项系数为正值,即沙堆高度随水平尺度的增加而升高,表明 4 种生境白刺灌丛沙堆均处于发育阶段(图 3)。

表 3 不同样地白刺灌丛沙堆形态参数的相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis of the morphological parameters of *Nitraria tangutorum* nebkhas in different sample plots

样地		长轴	短轴	水平尺度	沙堆高	底面积	体积
白刺	长轴	1					
	短轴	0.858 **	1				
	水平尺度	–	–	1			
	沙堆高	0.850 **	0.896 **	0.900 **	1		
	底面积	0.951 **	0.968 **	–	0.904 **	1	
	体积	0.847 **	0.932 **	0.914 **	0.969 **	0.942 **	1
白刺 +15 a 人工梭梭	长轴	1					
	短轴	0.884 **	1				
	水平尺度	–	–	1			
	沙堆高	0.782 **	0.817 **	0.822 **	1		
	底面积	0.963 **	0.973 **	–	0.852 **	1	
	体积	0.861 **	0.887 **	0.899 **	0.968 **	0.928 **	1
白刺 +10 a 人工梭梭	长轴	1					
	短轴	0.855 **	1				
	水平尺度	–	–	1			
	沙堆高	0.908 **	0.873 **	0.919 **	1		
	底面积	0.929 **	0.981 **	–	0.915 **	1	
	体积	0.915 **	0.917 **	0.950 **	0.969 **	0.962 **	1
白刺 +5 a 人工梭梭	长轴	1					
	短轴	0.861 **	1				
	水平尺度	–	–	1			
	沙堆高	0.880 **	0.829 **	0.890 **	1		
	底面积	0.956 **	0.954 **	–	0.886 **	1	
	体积	0.903 **	0.893 **	0.930 **	0.963 **	0.955 **	1

注：* * 表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关，* 表示 在 0.05 水平（双侧）上显著相关。

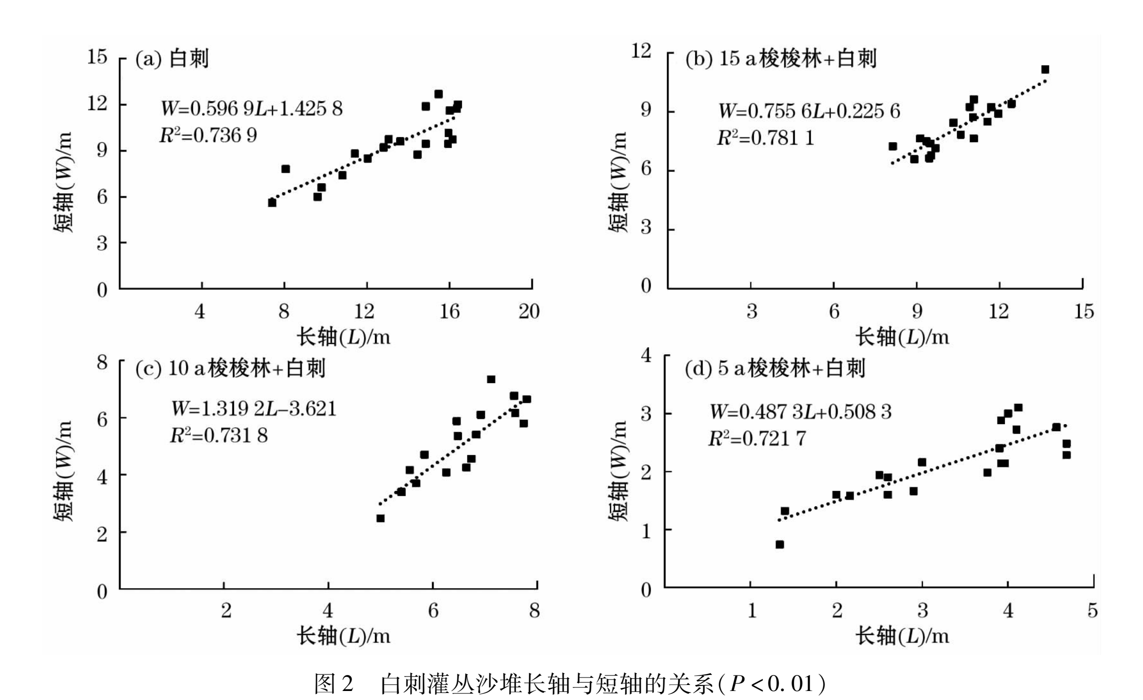


图 2 白刺灌丛沙堆长轴与短轴的关系（$P < 0.01$）

Fig. 2 Relationship between the length and width of *Nitraria tangutorum* nebkhas（$P < 0.01$）

2.3 不同生境白刺灌丛生长特征

白刺灌丛沙堆形态特征不仅与当地的地貌环境、风沙活动有关，还与植被特征有关，尤其是植被盖度，甚至影响着白刺灌丛沙堆的形成与演化。不

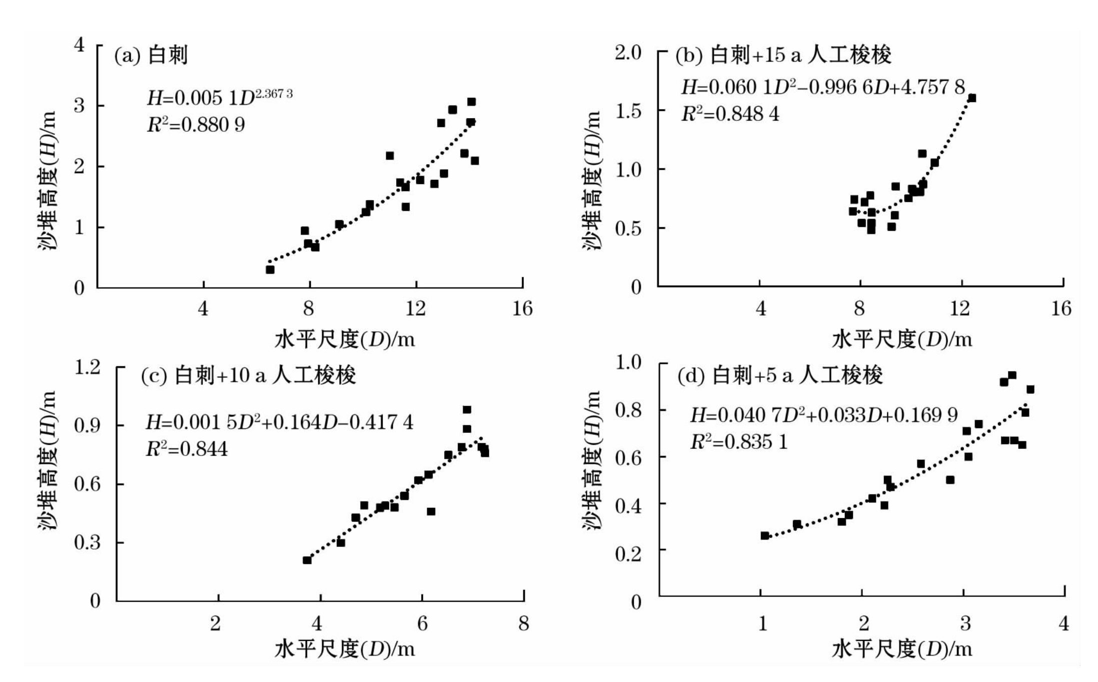


图3　白刺灌丛沙堆水平尺度与沙堆高度之间的关系（$P<0.01$）

Fig. 3　Relationship between the height and horizontal size of *Nitraria tangutorum* nebkhas（$P<0.01$）

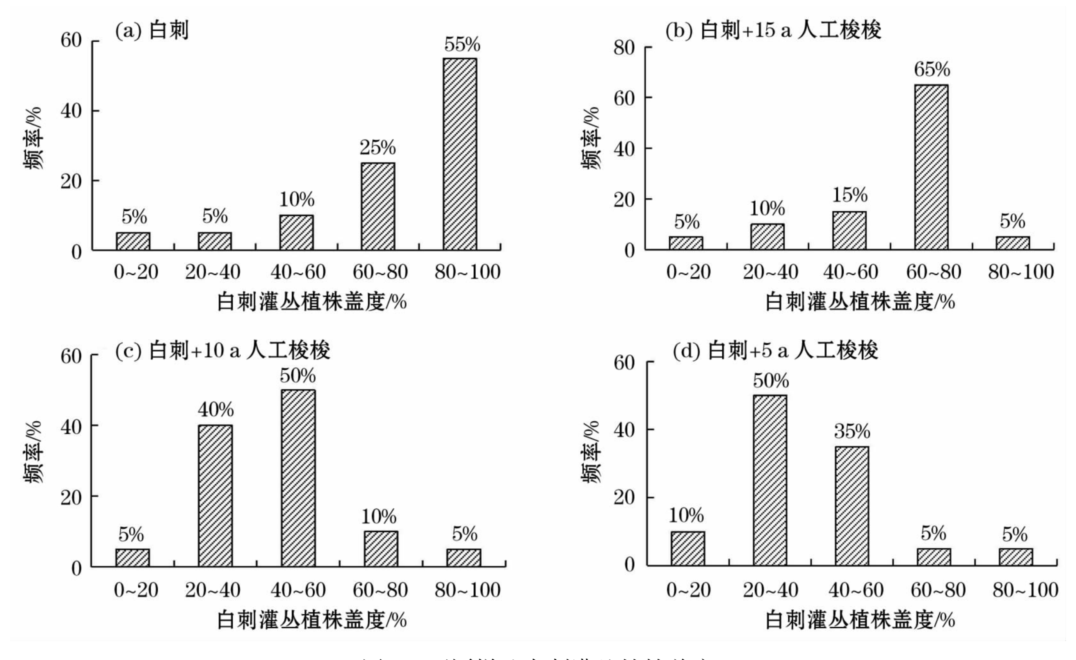


图4　不同样地白刺灌丛植株盖度

Fig. 4　Coverage of *Nitraria tangutorum* shrubbery in different sample plots

同生境的白刺沙堆盖度存在明显差异，在整个研究区中，白刺盖度主要集中在20%～80%。盖度大于60%的白刺灌丛沙堆占56.3%。如图4所示，盖度大于60%的沙堆频率主要集中在白刺和白刺+15 a人工梭梭生境中（图4a，4b）。盖度在20%～60%的沙堆频率主要集中在白刺+10 a人工梭梭和白刺+5 a人工梭梭生境中（图4c，4d）。该结果说明白刺盖度随体积和梭梭林龄（除白刺样地外）增加，白刺灌丛盖度逐渐增大。

3　讨论

在干旱、半干旱及干燥的亚湿润荒漠地区，白刺灌丛沙堆形态特征不仅受风力、沙源和植被等因素的影响，还因生境条件的差异导致其形态存在一定差异[11]。本研究以4种生境条件下白刺灌丛沙堆

为研究对象,研究其形态特征、形态参数关系、植被盖度等的差异性。研究表明,处于荒漠－绿洲过渡带的白刺灌丛沙堆各形态参数之间表现为高度线性相关且沙堆外形向长椭球形方向发展,部分向不对称“蝌蚪状”方向发展。该实验结果与刘冰等[12]和张萍等[13]分别对泡泡刺灌丛沙堆和白刺灌丛沙堆呈现圆形或近椭球的独立沙包的研究结果不同。随着梭梭林龄减短,灌丛沙堆规模和植被盖度随之减小。梭梭和白刺灌丛捕获沙物质能力减小,风速强度增大,使沙堆沿风向被逐渐拉长,部分沙堆向不对称“蝌蚪状”方向发展。这是梭梭和白刺灌丛植被盖度共同作用的结果。

3.1 不同生境对白刺灌丛沙堆形态特征的影响

本研究中,白刺灌丛沙堆高度在0.13～4.5 m,而小叶锦鸡儿灌丛沙堆高度在0.4～1.8 m,柽柳灌丛沙堆高度在1～15 m,说明灌丛沙堆高度与植被类型有关,植株低矮导致灌丛沙堆体积较小,而多年生灌木形成的灌丛沙堆体积较大。该结果与前人研究相似[14]。本研究还发现,梭梭林龄是影响白刺灌丛沙堆形态特征的重要因素。白刺灌丛沙堆各形态参数为:白刺＞白刺＋15 a梭梭＞白刺＋10 a梭梭＞白刺＋5 a梭梭(表2)。首先,随着梭梭林龄增加,梭梭株高和冠幅逐渐增加,其防风固沙能力逐渐增大,导致到达样地的风沙流强度逐渐减弱,使沙粒进行沉降堆积,白刺灌丛沙堆发育速度加快。其次,白刺灌丛沙堆本身也具有防风固沙能力,灌丛沙堆是由下部不通风积沙体和上部透风的灌丛植被组成,风积沙体和灌丛植被的空间占有率越高,其捕获沙源能力越强。因为这种下密上疏的结构形式有利于灌丛沙堆对风沙流进行分解,使穿过株间的气流由水平气流变为紊流,尤其在风积沙体与灌丛植被过渡带风速最低,风速降低导致其携沙能力下降,使沙尘物质在株间沉积[15]。特别是在春季,白刺枝条硬度较高,使灌丛对风沙流干扰作用更加显著[16]。另外,沙源距离可能也是导致灌丛沙堆发育的因素之一。与其他样地相比,白刺纯林距离亚玛雷克沙漠较近,丰富的沙源有利于白刺灌丛沙堆生长发育,使白刺灌丛沙堆规模增大[17],其对风沙流的分解作用和降尘能力成倍增加。而梭梭与白刺混合样地距亚玛雷克沙源地距离相对较远,可供应的沙物质逐渐减少,导致其沙堆形态参数逐渐减小[18]。该结论有待于进一步研究。

3.2 不同生境白刺灌丛沙堆形态参数关系分析

本研究发现,4种生境条件下的白刺灌丛沙堆各参数之间存在良好的相关关系($r>0.782$),说明各生境白刺灌丛沙堆各参数间协同发展,这是白刺灌丛自我发展保护机制[19]。其中,长轴与短轴、水平尺度与高度之间在0.01显著水平上相关系数r大于0.822,存在高度线性相关关系。长轴与短轴回归关系均为线性关系这与刘冰等[12]的研究结果相似。前人研究表明,在灌丛沙堆增长阶段,由于沙源供应充足,长轴与短轴呈线性增加且短轴先于长轴而存在。但在白刺＋10 a梭梭林混合样地的长轴先于短轴出现(图2),可能原因是由于梭梭林对风沙流的阻碍作用,改变了样地内风速廓线的变化规律,使流经此地的风沙流改变了其沙粒运移方向[15]。灌丛沙堆水平尺度与高度二次多项式经验模型是判断沙堆发育阶段的重要依据[20],但在白刺纯林中,由于高度与水平尺度间呈现幂函数且幂指数大于1,说明沙堆垂直增长速率大于水平增长速率。而在其他生境高度与水平尺度之间呈现二次函数关系且斜率均为正($R^2>0.8351$),说明各生境白刺灌丛沙堆均处于发育阶段[21]。

3.3 不同生境白刺灌丛生长特征

灌丛沙堆发育受植被的影响,灌丛与沙堆的发育是相互依存的[22－23],灌丛生长发育的差异性主要体现在株高和植被盖度[24],而灌丛生长发育的差异性主要受降水和地下水的影响。吉兰泰多年平均降雨量为121.1 mm且主要集中在7、8、9月,占全年总降雨量的70%以上,仅能维持白刺灌丛正常的生长发育,而不能对白刺生长发育起到促进作用[25]。由于4个样地相距不到8 km,降水的空间差异性不大,不是造成白刺生长差异性的原因。另外,白刺和梭梭生长适宜的地下水位埋深为1.8～4 m[26]。近年来,由于气候干旱和人为活动的干扰,吉兰泰地区地下水位已经下降到10～15 m[27],而4个样地的白刺灌丛沙堆均处于发育阶段,说明地下水并不是限制白刺生长的原因。其原因可能是由于白刺属枝源压条型克隆植物,具有较强的再生能力且适度沙埋,有利于不定根和分株萌生,使其灌丛沙堆外形呈椭球状,有利于增强植株捕沙能力。与此同时,梭梭减弱了风沙流强度,减小风沙对白刺灌丛的伤害,有利于白刺灌丛生长,其株高和盖度的增加,使经过该地区风沙流强度减弱,截获沙粒能力增强,进而增加白刺灌丛沙堆尺度[28],说明白刺灌丛对沙堆形成有明

显的控制作用[29]。此外,白刺株高随梭梭林龄增加而增高,可能是白刺灌丛沙堆沃岛效应的反馈作用。在沃岛效应作用下,促进了白刺株高增加[28],该实验结果有待于进一步论证。植物株高至少在 0.1 ~ 0.15 m 以上才能截获沙粒[30]。本研究中,白刺株高在 0.17 ~ 0.95 m,有利于白刺灌丛对沙粒截获。有研究表明,白刺盖度与输沙量呈反比例关系[31]。灌丛盖度与灌丛沙堆高度、面积、体积相关性较高且具有很好的线性关系[32]。本研究中,4 种不同生境条件下,白刺盖度在 45% ~ 83%,盖度最大为白刺生境,盖度最小为白刺 + 5 a 梭梭生境(图 4)。说明随着梭梭林龄的增加,白刺盖度增加,白刺灌丛高度、水平尺度和底面积也逐渐增大,与前人研究结果一致。

4 结 论

(1) 荒漠 – 绿洲过渡带 4 种生境的白刺灌丛沙堆呈现长椭球形,部分向不对称"蝌蚪状"方向发展。这是梭梭、沙源和白刺灌丛植被盖度共同作用的结果。

(2) 4 种生境下的灌丛沙堆各形态参数随梭梭林龄增加(白刺纯林除外)呈现逐渐增大的趋势。沙堆各形态参数表现为显著性相关($r > 0.782$),说明白刺灌丛沙堆协同发展。

(3) 4 种灌丛沙堆长轴与短轴、高度与水平尺度之间的回归方程分别为线性函数($R^2 > 0.721\ 7$)和幂函数、二次函数($R^2 > 0.835\ 1$)且斜率均为正,表明 4 种生境灌丛沙堆均处于发育状态。

(4) 白刺灌丛盖度对灌丛沙堆的形态特征有明显的影响,即白刺灌丛盖度越大,灌丛沙堆的高度、面积和体积也随之增大。

参考文献(References):

〔1〕 Tengberg A. Nebkha dunes as indicators of wind erosion and land degradation in the Sahel zone of Burkina Faso〔J〕. Journal of Arid Environments,1995,30(3):265 – 282.

〔2〕 杜建会,严平,丁连刚,等. 民勤绿洲不同演化阶段白刺灌丛沙堆表面土壤理化性质研究〔J〕. 中国沙漠,2009,29(2):248 – 253.〔Du Jianhui, Yan Ping, Ding Liangang, et al. Soil physical and chemical properties of *Nitraria tangutorun* nebkhas surface at different development stages in Minqin asis〔J〕. Journal of Desert Research,2009,29(2):248 – 253.〕

〔3〕 武胜利,李志忠,惠军,等. 和田河流域灌(草)丛沙堆的形态特征与发育过程〔J〕. 地理研究,2008,27(2):314 – 322.〔Wu Shengli, Li Zhizhong, Hui Jun, et al. The morphological characteristics and growth mode of nabkha in the basin of Hotan river, Xinjiang〔J〕. Geographical Research,2008,27(2):314 – 322.〕

〔4〕 阿丝叶 · 阿不都力米提,玉苏甫 · 买买提. 焉耆盆地不同生境白刺灌丛沙堆形态特征分析〔J〕. 中国农学通报,2016,32(32):117 – 123.〔Asiye Ablimit, Yusup Mamat. Morphological characteristics of *Nitraria* nebkhas in Yanqi basin under different habitats〔J〕. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(32):117 – 123.〕

〔5〕 彭飞,王涛,刘立超,等. 民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆演化阶段及其空间格局〔J〕. 中国沙漠,2012,32(3):593 – 599.〔Peng Fei, Wang Tao, Liu Lichao, et al. Evolution phases and spatial pattern of nebkhas in Minqin deset-oasis ectone〔J〕. Journal of Desert Research,2012,32(3):593 – 599.〕

〔6〕 来风兵,孙虎,张展赫,等. 塔克拉玛干沙漠和田河西侧胡杨沙堆的形态特征及空间分布格局〔J〕. 中国沙漠,2015,35(2):284 – 293.〔Lai Fengbing, Sun Hu, Zhang Zhanhe, et al. Morphological characteristics and spatial pattern of *Populus euphratica* nebkhas to the west of the Hotan river in the Taklimakan Desert〔J〕. Journal of Desert Research,2015,35(2):284 – 293.〕

〔7〕 关林婧,梅续芳,张媛媛,等. 狭叶锦鸡儿灌丛沙堆土壤水分和肥力的时空分布〔J〕. 干旱区研究,2016,33(2):253 – 259.〔Guan Linjing, Mei Xufang, Zhang Yuanyuan, et al. Spatiotemporal distribution of soil moisture content and fertility of *Caragana stenophylla* shrub nabkhas in different habitats〔J〕. Arid Zone Research,2016,33(2):253 – 259.〕

〔8〕 王心源,郭华东,邵芸,等. 利用多源遥感对吉兰泰盐湖沙漠侵害研究〔J〕. 水土保持学报,2001,15(1):110 – 115.〔Wang Xinyuan, Guo Huadong, Shao Yun, et al. Monitor of sand-drift invaded Jilantai salt lake using multi-source remote sensing data〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2001,15(1):110 – 115.〕

〔9〕 孔芳芳,谭利华,伍永秋,等. 柴达木盆地不同沉积区灌丛沙堆形态与沉积特征〔J〕. 北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(1):56 – 62.〔Kong Fangfang, Tan Lihua, Wu Yongqiu, et al. Morphological and sediments of nabkha in Qaidam basin〔J〕. Journal of Beijing Normal University(Natural Science Edition),2016,52(1):56 – 62.〕

〔10〕 左合君,杨阳,张宏飞,等. 阿拉善戈壁区白刺灌丛沙堆形态特征研究〔J〕. 水土保持研究, 2018,25(1):263 – 269.〔Zuo Hejun, Yang Yang, Zhang Hongfei, et al. Morphological characteristics of *Nitraria* dune in Gobi of Alashan〔J〕. Research of Soil and Water Conservation,2018,25(1):263 – 269.〕

〔11〕 Nickling W G, Wolfe S A. The morphology and origin of Nabkhas, region of Mopti, Mali, West Africa〔J〕. Journal of Arid Environments,1994,28(1):13 – 30.

〔12〕 刘冰,赵文智. 荒漠绿洲过渡带泡泡刺灌丛沙堆形态特征及其空间异质性〔J〕. 应用生态学报,2007,18(12):2 814 – 2 820.〔Liu Bing, Zhao Wenzhi. Morphological characteristic sand spatial heterogeneity of *Nitraria sphaerocarp* nebkhas in desert-oasis eco-

tone〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18 (12): 2 814 – 2 820. 〕
〔13〕 张萍,哈斯,岳兴玲,等. 白刺灌丛沙堆形态与沉积特征〔J〕. 干旱区地理, 2008, 31 (6): 130 – 136. 〔Zhang Ping, Ha Si, Yue Xingling, et al. *Nitaria* nebkhas: Morphology and sediments〔J〕. Arid Land Geography, 2008, 31(6):130 – 136. 〕
〔14〕 郎丽丽,王训明,哈斯,等. 灌丛沙丘形成演化及环境指示意义研究的主要进展〔J〕. 地理学报, 2012, 67(11):1 526 – 1 536. 〔Lang Lili, Wang Xunming, Ha Si, et al. Coppice dune formation and its significance to environmental change reconstructions in arid and semiarid areas〔J〕. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(11): 1 526 – 1 536. 〕
〔15〕 张萍,哈斯,吴霞,等. 单个油蒿灌丛沙堆气流结构的野外观测研究〔J〕. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5):881 – 889. 〔Zhang Ping, Ha Si, Wu Xia, et al. Filed investigation on airflow profile of an *Artemisia ordosica* nebkha dune〔J〕. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences, 2013, 21(5):881 – 889. 〕
〔16〕 安晶,哈斯,杜会石,等. 内蒙古高原小叶锦鸡儿灌丛沙堆对气流结构与风蚀的影响〔J〕. 干旱区研究, 2015, 32(2):304 – 312. 〔An Jing, Ha Si, Du Huishi, et al. Impact of *Caragana microphylla* nabkhas on airflow structure and wind erosion in Inner Mongolia plateau〔J〕. Journal of Arid Land Research, 2015, 32(2): 304 – 312. 〕
〔17〕 杨帆,王雪芹,何清,等. 绿洲 – 沙漠过渡带柽柳灌丛沙堆形态特征及空间分布格局〔J〕. 干旱区研究, 2014, 31(3):556 – 563. 〔Yang Fan, Wang Xueqin, He Qing, et al. Morphological features and spatial distribution pattern of *Tamarix ramosissima* nebkhas in an oasis-desert ecotone〔J〕. Arid Zone Research, 2014, 31(3):556 – 563. 〕
〔18〕 胡国云,郭中领,王仁德,等. 河北坝上低山区坡地灌丛沙堆形态与沉积特征〔J〕. 水土保持研究, 2016, 23(4):251 – 256. 〔Hu Guoyun, Guo Zhongling, Wang Rende, et al. Morphology and sediment characteristics of nebkhas on slopes in Bashang region, Hebei province〔J〕. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(4):251 – 256. 〕
〔19〕 张进虎,唐进年,李得禄,等. 民勤荒漠绿洲过渡带灌丛沙堆形态特征及分布格局〔J〕. 中国沙漠, 2015, 35(5):1 141 – 1 149. 〔Zhang Jinhu, Tang Jinnian, Li Delu, et al. Morphological characteristics and distribution patterns of nebkhas in desert-oasis ecotone〔J〕. Journal of Desert Research, 2015, 35(5):1 141 – 1 149. 〕
〔20〕 哈斯,杜会石,孙禹. 内蒙古高原小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛沙丘:形态特征及表面气流〔J〕. 第四纪研究, 2013, 33(2):314 – 324. 〔Ha Si, Du Huishi, Sun Yu. *Caragana microphylla* nebkhas in Inner Mongolia plateau: Morphology and airflow structure〔J〕. Quaternary Sciences, 2013, 33(2):314 – 324. 〕
〔21〕 Tengberg A, Chen D. A comparative analysis of nebkhas in central Tunisia and Northern Burkina Faso〔J〕. Geomorphology, 1998, 22(2):181 – 192.
〔22〕 杨光,马文喜,包斯琴,等. 亚玛雷克沙漠猫头刺和小叶锦鸡儿灌丛结构与风影沙丘间的关系〔J〕. 干旱区研究, 2016, 33(3): 540 – 547. 〔Yang Guang, Ma Wenxi, Bao Siqin, et al. Relationship between the structure of *Oxytropis aciphylla* and *Caragana microphylia* shrubberies and their wind-shadow dunes〔J〕. Arid Zone Research, 2016, 33(3):540 – 547. 〕
〔23〕 吴汪洋,张登山,田丽慧,等. 高寒沙地植物的沙堆形态特征及其成因分析〔J〕. 干旱区研究, 2018, 35(3):713 – 721. 〔Wu Wangyang, Zhang Dengshan, Tian Lihui, et al. Morphologic features and forming causes of plant sandpiles in alpine sand land〔J〕. Arid Zone Research, 2018, 35(3):713 – 721. 〕
〔24〕 赵洋,张志山,陈永乐,等. 油蒿(*Artemisia ordosica*)退化阶段对灌丛沙堆形态的影响〔J〕. 中国沙漠, 2015, 35(5):1 136 – 1 140. 〔Zhao Yang, Zhang Zhishan, Chen Yongle, et al. Effect of degradation stage of *Artemisia ordosica* on morphology of nebkhas〔J〕. Journal of Desert Research, 2015, 35(5):1 136 – 1 140. 〕
〔25〕 杨自辉,高志海. 荒漠绿洲边缘降水和地下水对白刺群落消长的影响〔J〕. 应用生态学报, 2000, 11(6):927 – 930. 〔Yang Zihui, Gao Zhihai. Impact of precipitation and underground water level in the edge of oases on growth and decline of *Nitraria tangugtorum* community〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(6):927 – 930. 〕
〔26〕 潘艺华,卢玉东. 内蒙古吉兰泰湖盆区地下水埋深与植被〔J〕. 城市地理, 2015(6):234 – 235. 〔Pan Yihua, Lu Yudong. The groundwater depth and vegetation in Jilantai lake area, Inner Mongolia〔J〕. City Geography, 2015(6):234 – 235. 〕
〔27〕 宋国慧. 沙漠湖盆区地下水生态系统及植被生态演替机制研究〔D〕. 西安:长安大学, 2012. 〔Song Guohui. Study on Groundwater Dependent Ecosystem and Ecological Mechanisms of Vegetation Succession in Desert Lake-Basin Region〔D〕. Xi'an: Chang'an University, 2012. 〕
〔28〕 韩磊,张媛媛,马成仓,等. 狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)灌丛沙堆形态发育特征及固沙能力〔J〕. 中国沙漠, 2013, 33(5):1 305 – 1 309. 〔Han Lei, Zhang Yuanyuan, Ma Chengcang, et al. Nabkha morphology, development and sand-fixing capability of *Caragana stenophylla* in the Inner Mongolia plateau〔J〕. Journal of Desert Research, 2013, 33(5):1 305 – 1 309. 〕
〔29〕 Elbana M I, Nijs I, Kockelbergh F. Microenvironmental and vegetational heterogeneity induced by phytogenic nebkhas in an arid coastal ecosystem〔J〕. Plant & Soil, 2002, 247(2):283 – 293.
〔30〕 刘博,刘红玲,穆宇迪,等. 塔里木河下游柽柳沙包稳定同位素碳与灌丛的相关〔J〕. 干旱区研究, 2018, 35(3):728 – 734. 〔Liu Bo, Liu Hongling, Mu Yudi, et al. Correlation between the stable carbon isotopes in annual layers of *Tamarix ramosissima* sand-hillocks in the lower reaches of the Tarim river〔J〕. Arid Zone Research, 2018, 35(3):728 – 734. 〕
〔31〕 李志忠,武胜利,肖晨曦,等. 新疆和田河流域灌丛沙堆风洞流场的实验研究(Ⅱ)〔J〕. 中国沙漠, 2007, 27(1):15 – 19. 〔Li Zhizhong, Wu Shengli, Xiao Chenxi, et al. Study on wind-tunnel simulated flow pattern over nabkha dunes in hetian river basin, Xinjiang(Ⅱ)〔J〕. Journal of Desert Research, 2007, 27(1):15 – 19. 〕

〔32〕张萍,哈斯,额尔敦,等. 小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛沙堆形态对沙源供给形式和丰富度的响应〔J〕. 中国沙漠,2015,35(6):1 453 – 1 460.〔Zhang Ping,Ha Si,Eerdun,et al. Responses of nebkhas morphology to the mode and richness of sand supply〔J〕. Journal of Desert Research,2015,35(6):1 453 – 1 460.〕

Morphological Features of *Nitraria tangutorum* Nebkhas in Different Habitats

WEI Ya-juan[1], WANG Ji[1,2], DANG Xiao-hong[1,2], ZHANG Yong[3], XIE Yun-hu[1], SHEN Gui-lu[4], DING Yan-long[1], WAN Fang[1]

(1. *College of Desert Control Science and Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010018, *Inner Mongolia*, *China*;
2. *Inner Mongolia Hangjin Desert Ecosystem Positioning Research Station*, *Ordos* 017400, *Inner Mongolia*, *China*;
3. *Xilin Gole League Forestry Investigation Designing Institute*, *Xilinhot* 026000, *Inner Mongolia*, *China*;
4. *Inner Mongolia Lantai Industrial Corporation*, *Alashan* 750336, *Inner Mongolia*, *China*)

Abstract: The morphological features of *Nitraria tangutorum* nebkhas in different habitats in the desert-oasis ecotone in Jilantai were investigated. The relationships among the morphological parameters and the growth of *N. tangutorum* nebkhas were quantitatively analyzed. The results are as follows: ① The morphological parameters of *N. tangutorum* nebkhas along their long ellipsoidal direction varied in a wide range with the increase of stand age of *Haloxylon ammodendron* (except the *N. tangutorum* area), and the luxuriantly growing thickets evolved in some areas; ② The correlation coefficients of the morphological parameters of *N. tangutorum* nebkhas in four different habitats were all higher than 0.782 and showed a significant correlation ($P < 0.01$), which was the result of the cooperated development of the nebkhas in various habitats; ③ The regression equation analysis revealed that there was a significant linear relationship between the length and width ($R^2 > 0.721\ 7$) and a relationship of power function and quadratic function between the horizontal size and height ($R^2 > 0.835\ 1$) of *N. tangutorum* nebkhas in various habitats. Which indicated that the *N. tangutorum* nebkhas were all at the developing stage; ④ The height and coverage of *N. tangutorum* shrubbery affected significantly the morphological features of *N. tangutorum* nebkhas, that means the height, basal area and volume of the nebkhas were increased with the increase of plant height and coverage of *N. tangutorum* shrubbery.

Key words: *Nitraria tangutorum*; nebkha; *Haloxylon ammodendron*; morphological feature; desert-oasis ecotone; Jilantai; Ulanbuh Desert